

Ketidakstabilan Gaya dan Interaksi Fluida-Struktur pada Turbin Sumbu Vertikal untuk Pembangkit Energi Arus Laut

Ridho Hantoro¹⁾, I.K.A.P. Utama²⁾, Erwandi³⁾, Aries Sulisetyono²⁾

¹⁾ Fakultas Teknologi Kelautan ITS, Surabaya

²⁾ Jurusan Teknik Perkapalan ITS, Surabaya

³⁾ BPP- Laboratorium Hydrodinamika Indonesia, Surabaya

Email: hantoro@ep.its.ac.id

ABSTRAK

Struktur dalam sebuah aliran fluida pada umumnya akan menimbulkan fluktuasi pada komponen-komponennya. Fluktuasi ini disebut sebagai osilasi yang disebabkan oleh fluida (*flow-induced oscillation*) dan menjadi aspek penting dalam lingkup aliran yang menyebabkan terjadinya mode-mode eksitasi alami (*natural excitation modes*). Adanya feedback loop dalam interaksi fluida-struktur yang sangat *tidak linier* dan dalam keadaan yang tertentu, maka hal ini dapat mendominasi gerakan dalam sistem interaksi fluida-struktur. Hal ini juga terjadi pada pembangkitan energi dari sumber energi terbarukan arus laut. Dengan adanya beban hidrodinamik laut yang berfluktuasi, sehingga dapat menyebabkan kerusakan struktur karena getaran yang diakibatkan oleh turbin yang bekerja terus-menerus di dalam fluida laut. Makalah ini menganalisis ketidakstabilan gaya yang bekerja pada turbin yang bekerja di dalam sebuah fluida laut yang bergerak dinamis. Aspek interaksi antara fluida dan struktur dibahas dalam kondisi turbin yang berotasi penuh beserta dinamika perubahan gayanya. Penelitian dilakukan secara simulasi numerik dengan data rpm yang telah didapatkan dari pengujian model sebelumnya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *foil* jenis NACA 0018 tanpa puntiran (*twist*). Hasil simulasi mengindikasikan adanya fluktuasi gaya yang harmonik selama turbin berotasi penuh 360 derajat terdapat fenomena munculnya dua pola fluktuasi dari resultan gaya yang dihasilkan. Perbandingan nilai Koefisien gaya seret (*Cd*) dan Koefisien gaya angkat (*Angkat*) dilakukan pada sudut serang 0-90 derajat dan memberikan nilai kesalahan maksimum 6% untuk *Cl* dan 7% untuk *Cd*. Dinamika perubahan gaya disimulasikan dalam interval 5 derajat dan menggunakan variasi kecepatan *upstream* dengan nilai 1 m/s, 2 m/s, dan 3 m/s.

Kata kunci: Arus laut, fluktuasi gaya, getaran, interaksi fluida-struktur

ABSTRACT

Structure in a fluid flow general will lead to fluctuations. This fluctuation is called the flow-induced oscillation and became an important aspect within the scope of the flow that results in natural excitation modes. The existence of feedback loops in the fluid-structure interaction is highly non-linear and in certain circumstances, this will dominate the movement in the system fluid-structure interaction. This also occurs in the generation of energy from ocean currents renewable energy resource. As the hydrodynamics forces are fluctuate, it can cause structural damage due to vibration caused by the turbine which is working continuously in the ocean environment. This paper provides analysis of the instability of the force acting on the turbine works in a fluid flows. Aspects of interaction between fluid and structure are discussed in a rotating turbine condition management and its dynamics pattern. Numerical simulations research is carried out with rpm data obtained from the previous prototype testing. Simulations performed using NACA 0018 foil type without twist and there are two phenomenon patterns generated from the resultant force. Simulation results indicating the harmonic force fluctuations during a full 360 degrees turbine rotation. Comparison of drag coefficient and lift coefficient at angle of attack of 0-90 degrees and resulting the maximum error of 6% lift coefficient and 7% for drag coefficient. Dynamics force fluctuation are simulated in the interval of 5 degrees with variation of the upstream velocity of 1 m/s, 2 m/s, and 3 m/s.

Keywords: Ocean current, force fluctuation, vibration, fluid-structure interaction

PENDAHULUAN

Motivasi yang melatarbelakangi penelitian ini adalah munculnya fenomena getaran pada pengujian awal prototype turbin jenis kantilever vertikal-aksis. Prototype diuji dalam *towing-tank* dengan seluruh struktur berada didalam fluida. Setiap foil terangkai pada poros silinder melalui dua lengan di setiap ujungnya. Gaya hidrodinamika yang beraksi karena aliran pada *foil* menghasilkan torsi pada *foil* dan pada seluruh sistem turbin. Aspek penting dari turbin jenis vertikal-aksis adalah bahwa turbin jenis ini dapat terus beroperasi lebih stabil dengan arah datangnya arus dari semua arah [1], tetapi juga menimbulkan fluktuasi gaya dalam lingkup interaksi fluida dan struktur.

Lebih jauh tentang pengembangan turbin sebagai salah satu komponen utama dalam sebuah sistem pembangkit, penelitian-penelitian dilakukan dengan tujuan perbaikan efisiensi dengan melakukan analisa terhadap variable yang mempengaruhi [2,3]. Salah satu aspek yang penting dalam kinerja sebuah turbin adalah pengaruh getaran (vibrasi) yang selalu muncul karena gerak rotasi yang terjadi [4]. Pada kasus turbin pada aplikasi arus laut, maka gerakan rotasi turbin disebabkan oleh aliran yang melewati turbin sehingga getaran yang terjadi menjadi lebih kompleks, yaitu karena perilaku aliran yang berinteraksi dengan struktur yang menyebabkan struktur bergerak rotasi dan memberikan kontribusi getaran torsional. Pada aspek aliran yang menyebabkan struktur bergerak, maka hubungan aliran fluida-struktur yang merupakan suatu sistem interaktif dan berinteraksi secara dinamis menjadi penting untuk dikaji. Sistem ini adalah suatu sistem *coupling* dari gaya yang bekerja pada struktur yang ditimbulkan oleh fluida di sekelilingnya..

Struktur dalam sebuah aliran fluida pada umumnya akan menimbulkan fluktuasi pada komponen-komponennya. Fluktuasi ini disebut sebagai osilasi yang disebabkan oleh fluida (*flow-induced oscillation*) dan menjadi aspek penting dalam lingkup aliran yang menyebabkan terjadinya mode-mode eksitasi alami (*natural excitation modes*). Adanya umpan balik tertutup (*feedback loop*) dalam interaksi fluida-struktur yang sangat tidak linier dan dalam keadaan yang tertentu, maka hal ini dapat mendominasi gerakan dalam sistem interaksi fluida-struktur [5].

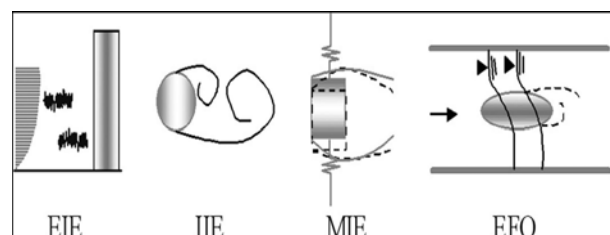
Data yang tersedia untuk setiap mode getaran pada umumnya termasuk amplitudo, simpangan, kecepatan dan percepatan. Respons yang dihasilkan

adalah linier dan translasional untuk mode tekanan dan angular untuk mode torsional. Pada saat mode vibrasi bersifat *independent*, maka sistem dapat dideskripsikan dengan mempelajari setiap mode secara terpisah. Namun demikian secara umum sistem memiliki dua atau lebih derajat kebebasan sehingga respon dapat dianalisis hanya dengan menyelesaikan persamaan diferensial secara simultan.

Seperti yang telah menjadi perhatian Naudascher [6], bahwa penelitian awal tentang sumber-sumber yang dapat menghasilkan beban hidrodinamik perlu dilakukan dan diidentifikasi untuk mengetahui efek-efeknya. Catatan tentang klasifikasi fluktuasi gaya hidrodinamik diberikan oleh Sarpkaya [7]. Naudascher mengembangkan skema investigasi untuk mengidentifikasi dengan jelas sumber beban hidrodinamik dan menggabungkannya dengan klasifikasi serta terminologi yang dikembangkan oleh Sarpkaya sebagai berikut :

Terdapat empat kategori sumber fluktuasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1:

- 1) *Extraneously induced excitation* (EIE), disebabkan oleh fluktuasi kecepatan atau tekanan yang tidak tergantung pada stabilitas aliran yang datang dan mengenai struktur dan tidak tergantung terhadap gerakan struktur kecuali pengaruh dari penambahan massa (*added mass*).
- 2) *Instability induced excitation* (IIE), merupakan ketidakstabilan aliran yang disebabkan oleh hasil interaksi aliran dan struktur. Penyebab timbulnya adalah adanya *vortex shedding*, pergeseran *shear layer*, kavitasi, dan ketidakstabilan aliran *swirling*.
- 3) *Movement induced excitation* (MIE), Fluktuasi jenis MIE merupakan hasil langsung dari gerakan oleh struktur. Sebuah struktur yang bergerak dalam fluida menyebabkan ketidak-teraturan (*unsteady*) aliran disekitar struktur dan karenanya maka gaya dinamis fluida pada struktur dibangkitkan.
- 4) *Excitation due to fluid oscillator* (EFO), adalah fluktuasi yang dihasilkan oleh fluida yang telah terpengaruh oleh osilasi.



Gambar 1. Kategori Interaksi Fluida-Struktur

Dari aspek struktural terdapat banyak penelitian yang telah dilakukan, diantaranya dalam lingkup fenomena struktur yang berputar dan bergetar. Mohiuddin et al [8] merepresentasikan model elastodinamik untuk tekanan dan gerakan torsional diturunkan menggunakan pendekatan *Lagrangian*. Model yang dikembangkan memperkirakan efek giroskopik dengan hasil yang baik, dan sama baiknya juga ketika memperkirakan gabungan inersia antara deformasi tekanan dan torsional. Penelitian tentang getaran torsional dilakukan oleh Al-Nassar et.al [9], menyelidiki efek fleksibilitas torsional poros dan mengembangkan sebuah model dinamik tidak linier untuk getaran karena tekanan pada *foil*. Koefisien pada persamaan yang dikembangkan meliputi parameter sistem seperti kecepatan rotasi, eksitasi frekuensi pada getaran torsional poros, dan frekuensi natural. Simulasi yang dilakukan menunjukkan daerah yang tidak stabil untuk getaran foil pada saat frekuensi eksitasi torsional memiliki harga lebih rendah dibandingkan dengan frekuensi natural tekanan dari *foil*.

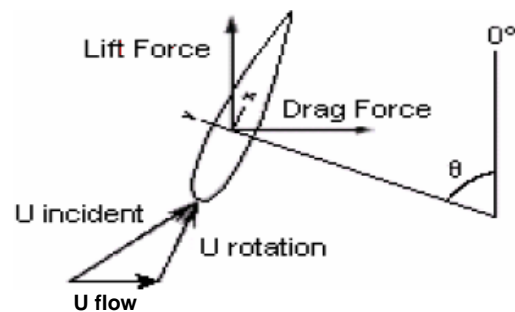
Behzad dan Bastami [10] menyelidiki efek rotasi poros pada frekuensi naturalnya. Terpisah dari efek giroskopik, gaya aksial yang muncul karena gaya sentrifugal dan efek *poisson* memberikan perubahan frekuensi natural poros. Hasil numerik yang didapatkan menunjukkan bahwa *axial stress* yang dihasilkan oleh rotasi poros memberikan pengaruh besar terhadap frekuensi natural poros. Dalam kasus ini besarnya diameter tidak memberikan pengaruh karena poros yang diteliti memiliki panjang yang sangat signifikan dibanding diameternya. Al-Bedoor et al [11] melakukan penelitian dan mengacu kepada [9] tentang getaran paksa pada sebuah *foil* yang berotasi secara fleksibel yang disebabkan oleh vibrasi torsional poros. Persamaan diferensial orde-dua dihasilkan dengan mengadopsi model dinamik tidak linier. Solusi respon gaya dibandingkan dengan integrasi numerik dan memberikan manfaat untuk mengetahui daerah kecepatan yang berbahaya berhubungan dengan nilai torsional *saft* dan natural frekuensi.

Zdravkovich[12], memberikan kategori dan mengobservasi mode-mode *vortex shedding*. Pertama, mode kecepatan rendah yang disebabkan oleh ketidakstabilan area olakan laminar disamakan dengan mode kecepatan tinggi yang dikontrol oleh mekanisme kemunculan dan formasi. Perhatian lebih ditekankan pada transisi dari mode kecepatan rendah. Kedua, mengenai *vortex shedding* yang tersinkronisasi, yaitu pada saat osilasi transversal silinder mengambil alih kontrol

dari frekuensi *vortex shedding*. Kemudian kedua mode muncul meskipun frekuensi sebelumnya tidak berubah. Sudut phase antara gaya yang bekerja pada silinder karena fluida dan pergeserannya menunjukkan sebuah lompatan yang tidak kontinyu ditengah-tengah area sinkronisasi dimana amplitudo maksimum tercapai pada silinder yang bebas berosilasi. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan phase *vortex shedding* secara mendadak sebesar 180°. Ketiga, adanya jenis sinkronisasi *vortex shedding* yang lain yang digambarkan merupakan akibat dari aliran karena osilasi silinder atau ketika sebuah silinder yang diam ada dalam sebuah aliran yang berosilasi.

METODE PENELITIAN

Turbin terdiri dari 3 *foil* lurus dengan panjang 1 meter dan terangkai statis terhadap poros melalui dua lengan, sehingga terdapat beda sudut of $\theta=120^\circ$ antara satu *foil* dan lainnya. Profil *foil* NACA 0018 digunakan dengan panjang *chord* 0.1 meter. Dengan posisi *foil* relatif tetap terhadap poros maka terdapat dua kecepatan yang beraksi pada *foil*, yaitu kecepatan *upstream* aliran dan kecepatan rotasi *foil* (Gambar 2). Dua kecepatan tersebut menghasilkan gaya angkat dan seret serta resultan gaya dari keduanya. Dalam makalah ini angkat didefinisikan sebagai gaya yang searah dengan *upstream* dan seret adalah gaya yang tegak lurus terhadap *upstream*.



Gambar 2. Komponen Angkat dan Seret pada *Foil*

Dengan demikian maka gaya angkat dan seret pada foil akan selalu berubah terhadap waktu pada saat berotasi, sehingga akan terdapat penurunan momentum aliran setelah melewati turbin sebagai hasil dari sapuan *foil* yang berada pada *upstream*. Dalam pengujian awal, pada prototipe turbin muncul osilasi getaran yang signifikan sebanyak tiga kali dalam satu rotasi penuh. Hal ini dimungkinkan karena gaya hidrodinamik pada *foil*. Untuk memahami lebih jauh fenomena ini maka dilakukan simulasi *computational fluid dynamic* (CFD).

Domain 3D dibuat untuk mensimulasi kondisi aliran pada turbin. Simulasi dilakukan secara *Steady State* dengan mengambil *rotating wall* sebagai *boundary condition* pada *foil*. Turbin dengan 3 *foil* diletakkan pada domain dengan radius 0.5 meter dari aksis rotasi. *Meshing* dilakukan dengan *trilateral surface mesh* dengan kerapatan 5 mm pada *foil* dan poros (Gambar 3). Kondisi aliran masuk tetap pada $U = 1$ m/s, 2 m/s, dan 3 m/s normal terhadap *boundary*, dengan nilai intensitas turbulent sebesar 5%.

Kondisi luaran dari *stationary domain* di-set sebagai sebuah bukaan, hal yang sama juga dilakukan pada kondisi dinding bagian atas dan bawah *domain*. Dinding permukaan *foil* dan poros dimodelkan sebagai permukaan halus dengan kondisi tanpa slip. Berdasarkan data putaran pengujian awal maka turbin beroperasi pada perbandingan kecepatan *foil-tip* (TSR) 2.56 untuk kecepatan aliran *upstream* 1 m/s, 2.17 untuk kecepatan aliran *upstream* 2 m/s, dan 2 untuk kecepatan aliran *upstream* 3 m/s, sehingga kecepatan rotasional pada *foil* di-set pada kecepatan-kecepatan angular tersebut di atas. Simulasi dilakukan dengan menggunakan model turbulen k- ω untuk *foil* dan poros. Model turbulen ini menyelesaikan persamaan kinetik energi (k) standart. Persamaan penentuan panjang (ω) digunakan kuantitas yang sering disebut dengan disipasi spesifik dari definisi $\omega \propto \varepsilon/k$. Persamaan k dan ω dimodelkan sebagai berikut:

$$(\rho \bar{U}_j k)_{,j} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right]_{,j} + P_k - \beta^* \omega k \quad (1)$$

$$(\rho \bar{U}_j \omega)_{,j} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \omega_{,j} \right]_{,j} + \frac{\omega}{k} (c_{\omega 1} P_k - c_{\omega 2} \rho k \omega) \quad (2)$$

dengan $\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$, $\varepsilon = \beta^* \omega k$.

konstanta tersebut ditentukan seperti: $\beta^* = 0.09$, $c_{\omega 1} = 5/9$, $c_{\omega 2} = 3/40$, $\sigma_k^* = 2$, dan $\sigma_\omega = 2$.

Ketika fungsi dinding digunakan, k dan ω ditunjukkan dengan Persamaan 3.

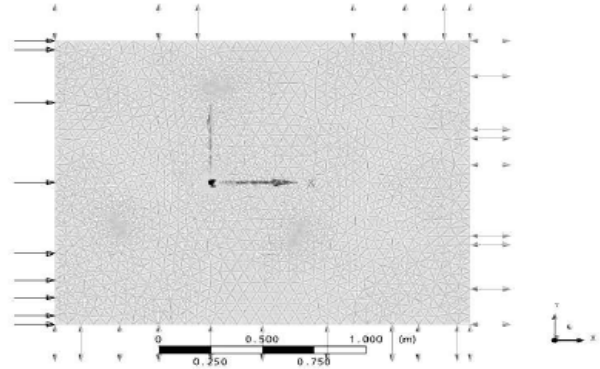
$$k_{wall} = (\beta^*)^{-1/2} u_*^2, \quad \omega_{wall} = (\beta^*)^{-1/2} \frac{u_*}{\kappa y} \quad (3)$$

Pada daerah dengan turbulen rendah dimana k dan ε menuju nol, permasalahan numerik yang besar pada model k- ε muncul pada persamaan ε saat k menuju nol. Pernyataan destruksi pada persamaan ε mengikutsertakan ε^2/k , dan ini menyebabkan masalah saat $k \rightarrow 0$, dan juga saat ε juga menuju nol, keduanya harus menuju nol secara benar untuk menghindari masalah, dan hal ini sering tidak terjadi. Secara kontras, tidak terjadi masalah yang sama pada persamaan ω . Bila $k \rightarrow 0$

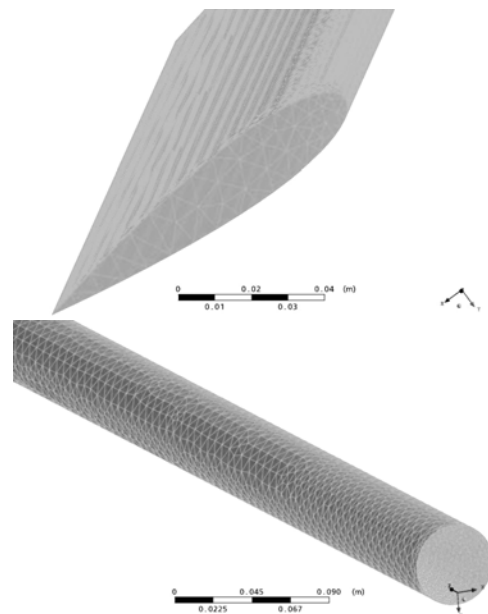
pada persamaan ω pada Persamaan 2. Pernyataan difusi turbulen secara sederhana juga menuju nol. Pada persamaan ω tidak mengikutsertakan k sebagaimana Persamaan 4.

$$\frac{\omega}{k} c_{\omega 1} P_k = \frac{\omega}{k} c_{\omega 1} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = c_{\omega 1} \beta^* \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

Sehingga model k- ω baik digunakan untuk memprediksi *transitional* dan *recirculating flow*.



a. Meshing dengan Tiga Foil dan Poros dalam Domain Fluida



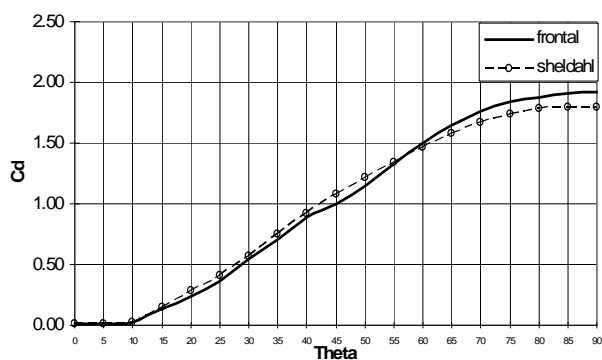
b. Meshing pada Permukaan Foil dan Poros

Gambar 3. Hasil Meshing pada Domain dan Komponen Turbin

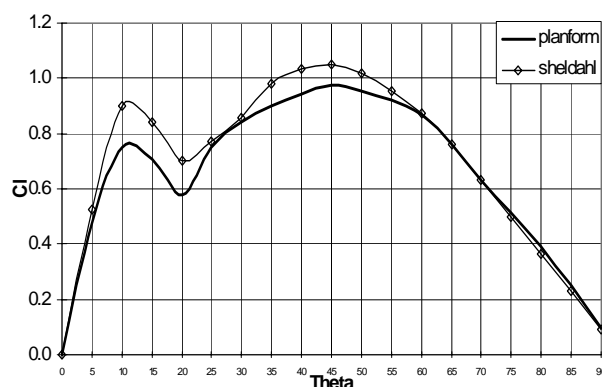
HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Numerik

Model *foil* divalidasi untuk perubahan sudut theta dari 0° sampai 90° dibandingkan dengan data literature NACA 0018 *airfoil* [13]. Hasil simulasi dengan CFD yang dilakukan terlihat pada Gambar 4 dan Tabel 1.



(a) Validasi Koefisien Angkat NACA 0018



(b) Validasi Koefisien Seret NACA 0018

Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai Cd dan Cl pada $Re=36000$ **Tabel 1. Penyimpangan Hasil Simulasi Terhadap Data pada Literatur [13]**

Sudut	Gaya Seret	Gaya Angkat	Cd	Cl
0	0.0004	0.0000	5%	2%
5	0.0005	0.1056	2%	9%
10	0.0009	0.1668	14%	16%
15	0.0054	0.1572	7%	16%
20	0.0095	0.1284	15%	17%
25	0.0146	0.1668	10%	3%
30	0.0216	0.1871	5%	1%
35	0.0282	0.2000	5%	8%
40	0.0355	0.2091	3%	9%
45	0.0399	0.2164	7%	7%
50	0.0460	0.2119	5%	6%
55	0.0531	0.2040	1%	4%
60	0.0600	0.1920	2%	1%
65	0.0657	0.1692	4%	0%
70	0.0704	0.1404	6%	1%
75	0.0735	0.1136	6%	2%
80	0.0749	0.0868	5%	7%
85	0.0761	0.0556	6%	9%
90	0.0767	0.0216	7%	8%
			6%	7%

Penyimpangan hasil simulasi terhadap data standar pada Cd dan Cl bernilai antara 1% sampai 17%. Nilai-nilai kesalahan dengan presentasi nilai yang besar terjadi pada simulasi dengan sudut serang antara 10° - 20° . Hal ini disebabkan karena pada daerah tersebut merupakan daerah dimana *airfoil* mengalami *stall* seperti terlihat pada grafik standar NACA 0018 dari Sheldahl dan Klimas. Meskipun *airfoil* jenis NACA 0018 telah ada untuk waktu yang lama, namun menurut Claessens [14] tidak banyak data eksperimen yang tersedia. Data yang tersedia dikeluarkan oleh Sandia National Laboratories pada tahun 1981 dan juga digunakan oleh Claessens. Pada literature Sheldahl dan Klimas [13] disampaikan bahwa data-data Cd dan Cl untuk beberapa *airfoil* (NACA 0018, 0021, 0025) merupakan hasil sintesis komputer terhadap data eksperimen beberapa profil yang memiliki kemiripan (NACA 0009, 0012, 0015). Hasil simulasi dalam penelitian ini dinyatakan cukup valid karena kesalahan rata-rata yang terjadi kurang dari 10% [15]

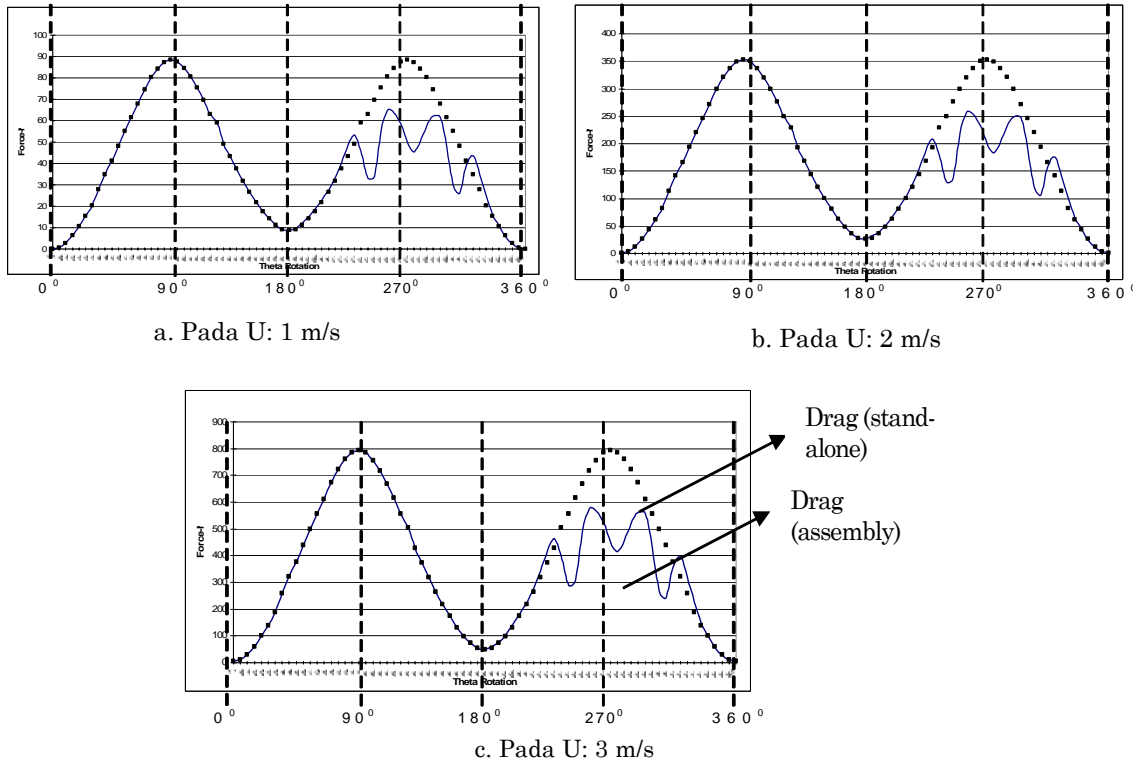
Fluktuasi Gaya

Dari data hasil simulasi yang dilakukan terdapat karakteristik dinamik fluktuasi gaya yang berbeda pada sebuah *foil* yang disimulasikan secara individu (*stand alone*) dan dalam rangkaian turbin (*assembly*).

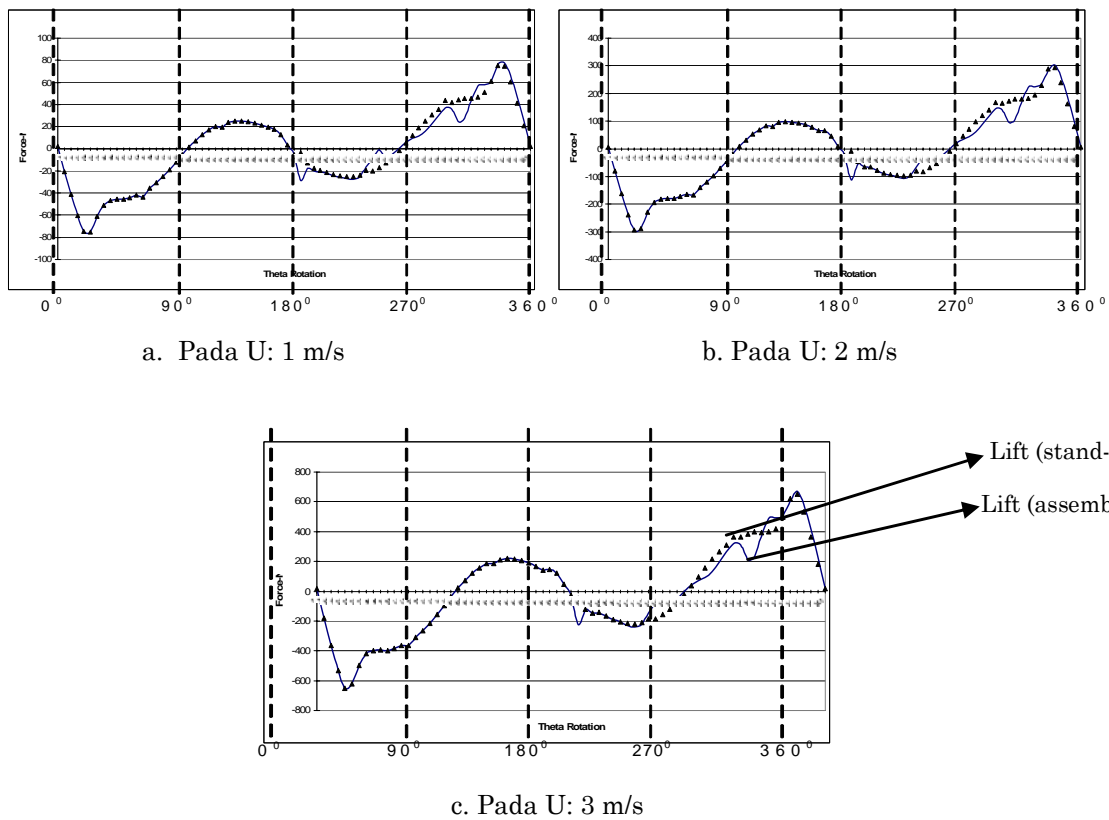
Dinamika fluktuasi gaya seret dan angkat diperlihatkan dalam Gambar 5 dan 6. Terlihat bahwa tidak terdapat fluktuasi pada dua kondisi simulasi yang berbeda (*stand alone* dan *assembly*) pada *foil* ketika posisi rotasi $<180^{\circ}$. Hal ini disebabkan karena aliran *upstream* yang diterima belum mengalami gangguan karena melewati struktur/komponen lain dari turbin.

Perilaku yang berbeda pada dua kondisi simulasi terjadi pada saat posisi rotasi *foil* berada pada Sudut theta $>180^{\circ}$. Perbedaan fluktuasi ini terjadi pada kondisi ketiga *foil* terangkai. Adapun penyebab utamanya adalah pola aliran *upstream* yang telah terganggu karena sapuan *foil* yang berada di daerah *upstream*. Dalam lingkup gaya fluida maka aliran yang terganggu akan memberikan nilai intensitas turbulen yang meningkat karena gerakan benda dan hal ini masuk dalam klasifikasi *movement induced oscillation* [6].

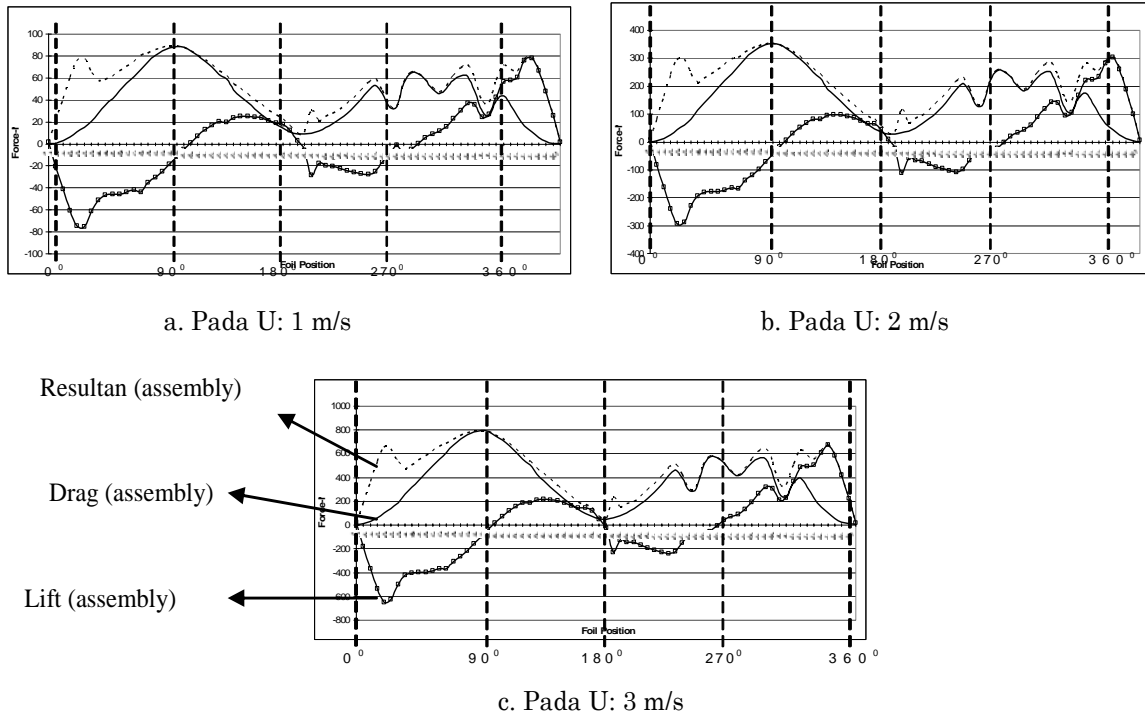
Total fluktuasi gaya resultan yang terjadi pada setiap *foil* dan poros merupakan resultan dari gaya-gaya yang terjadi pada setiap komponen tersebut diperlihatkan pada Gambar 7 dan 8.



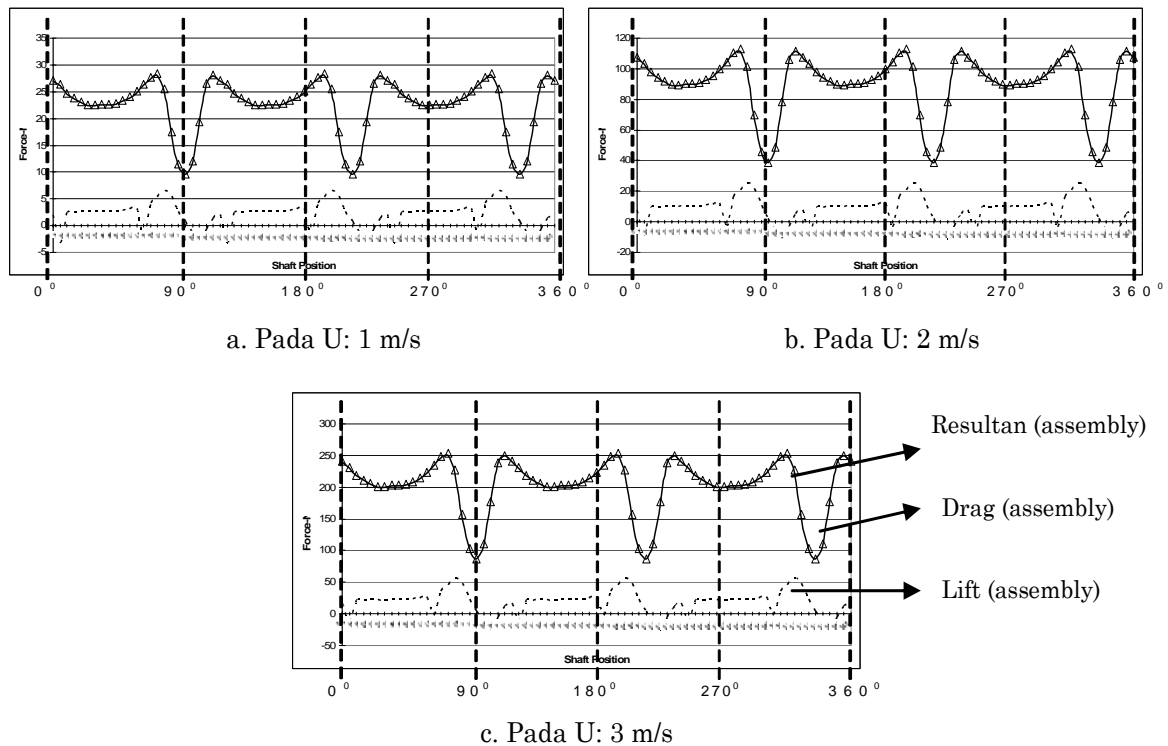
Gambar 5. Fluktuasi Gaya Seret pada Sebuah Foil



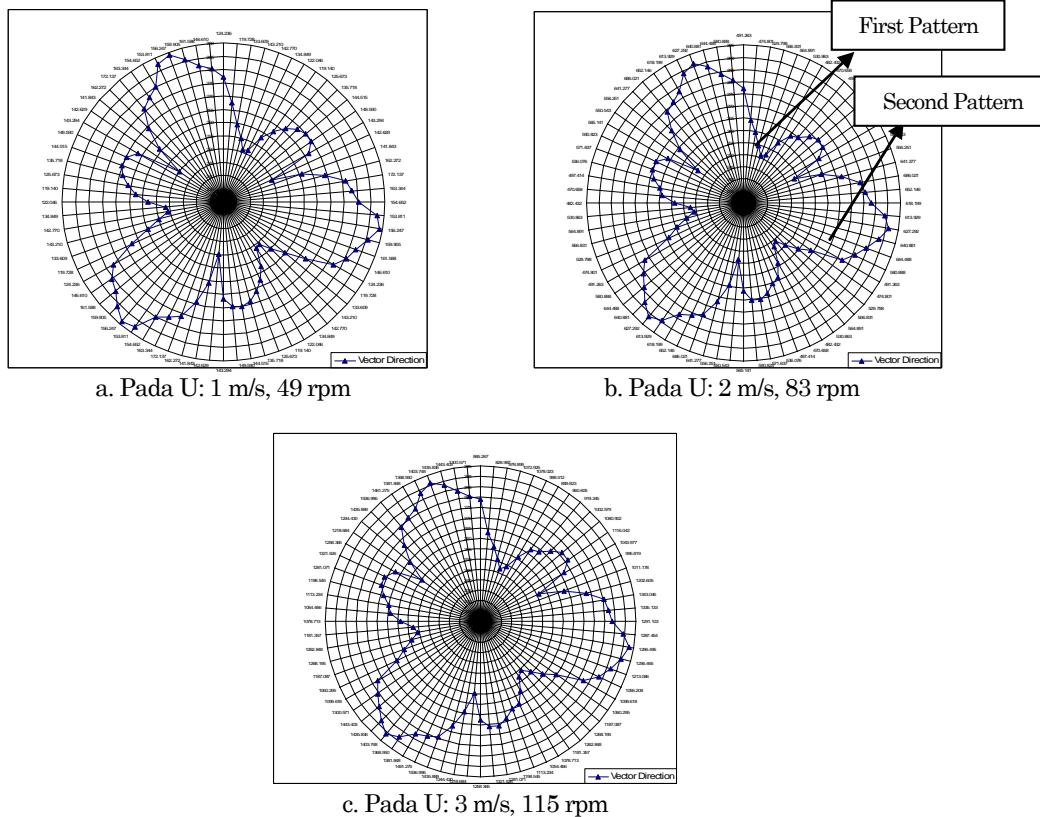
Gambar 6. Fluktuasi Gaya Angkat pada Sebuah Foil



Gambar 7. Total Fluktuasi Gaya Foil Kondisi Terangkai



Gambar 8. Fluktuasi Gaya pada Poros Kondisi Terangkai



Gambar 9. Fluktuasi Gaya dan Arah pada Turbin

Optimasi total resultan dan arah gaya untuk seluruh komponen turbin merupakan total gaya resultan dari setiap komponen turbin seperti diperlihatkan pada Gambar 9.

Dari kurva pada Gambar 9 terlihat adanya dua pola fluktuasi vektor total gaya resultan pada turbin dalam satu ratasi penuh 360° . Pola pertama memberikan nilai fluktuasi lebih besar dari pola kedua dan terjadi pada sudut theta $25^\circ - 65^\circ$, $145^\circ - 185^\circ$, and $265^\circ - 25^\circ$. Sedang pola fluktuasi yang kedua terjadi sudut theta $65^\circ - 145^\circ$, $185^\circ - 265^\circ$, and $305^\circ - 25^\circ$. Adanya perubahan orientasi arah dan gaya ini yang kemudian menyebabkan potensi kegagalan sistem seperti telah terbukti pada saat turbin diuji pada *towing tank*. Pada pengujian yang dilakukan terjadi kerusakan dengan patahnya poros karena fluktuasi gaya yang terus bekerja pada poros seperti terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Efek Fluktuasi Gaya Dengan Pengujian *Towing Tank*

KESIMPULAN

Simulasi numerik pada turbin sumbu vertikal untuk pembangkitan energi arus laut telah dilakukan sebagai penelitian lanjutan dari pengujian awal prototype yang ada. Validasi *foil* secara numerik pada airfoil NACA 0018 memberikan kesalahan 6% untuk nilai Koefisien Seret (Cd) dan 7% untuk nilai Koefisien Angkat (Cl). Fluktuasi gaya pada turbin dengan pola-pola yang memiliki kemiripan karakteristik untuk tiga variasi aliran *upstream* yang digunakan dan sebanding dengan frekuensi rotasi turbin. Kenaikan rata-rata gaya seret, gaya angkat, dan resultan gaya pada setiap kenaikan kecepatan aliran 1 m/s berturut-turut adalah 65.34%, 66.09%, dan 63.67%.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DP2M Dikti yang mendanai penelitian ini melalui skema Hibah Pascasarjana – HPTP Tahun 2009.

DAFTAR PUSTAKA

1. Salter S., *Pitch Control for Vertikal-aksis, Marine-Current Generators*, World Renewable Energy Conference Aberdeen 2005

2. Kiho S., Shiono M., and Suzuki K., *The Power Generation From Tidal Currents by Darrieus Turbine*, WRFC 1996.
3. Guido Calcagno, *An Experimental Investigation and a Theoretical and Computational Methodology to Study an Innovative Technology for Marine Current Exploitation: the Kobold Turbine*, Bollettino della Comunità Scientifica in Australasia, Dicembre 2006.
4. Hantoro R., Utama I.K.A.P., Erwandi, *Flow Visualization in the Study of Vortex-Induced Vibration (VIV) and Torsional Vibration (TV) on the Vertikal-aksis Ocean Current Turbine (VAOCT)*, International Symposium On Ocean Science, Technology And Policy, World Ocean Conference 2009.
5. Liu B.-L. and O'Farrell J.M., *High Frequency Flow/Structural Interaction in Dense Subsonic Fluids*, NASA Contractor Report 4652.
6. Naudascher, E., *Flow-Induced Streamwise Vibrations of Structures*, Journal of Fluids and Structures 1, 265-298, 1987.
7. Sarpkaya, T., *A Critical Review of the Intrinsic Nature of Vortex-Induced Vibrations*, Journal of Fluids and Structures 19, 389-447, 2004.
8. Mohiuddin M. A., and Khulief Y. A., *Coupled Tekanan Torsional Vibration of Rotors using Finite Element*, Journal of Sound and Vibration 223(2), 297-316, 1999.
9. Al-Nassar Y. N., and Al-Bedoor B. O., *On The Vibration of A Rotating Foil On A Torsionally Flexible Poros*, Journal of Sound and Vibration 259(5), 1237-1242, 2003.
10. Behzad M., Bastami A.R., *Effect of centrifugal force on natural frequency of lateral vibration of rotating poross*, Journal of Sound and Vibration 274, 985-995, 2004
11. Al-Bedoor B.O., Al-Qaisia A.A., *Stability Analysis of Rotating Foil Tekanan Vibration Due To Torsional Excitation*, Journal of Sound and Vibration 282, 1065-1083, 2005
12. Zdravkovich M. M., *Different modes of vortex shedding: an overview*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 10, pp. 427-437, 1996
13. Sheldahl, R.E. and Klimas P.C., *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*, Sandia National Laboratories Unlimited Release, 1981.
14. Claessens, M.C., *The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines*, Master of Science Thesis, Aerospace Engineering, Delft University of Technology, November 9, 2006.
15. Utama, IKAP., Murdijanto, *Analisis CFD Terhadap Perilaku Gerak Kapal Ketika Mendekati Dermaga*, Prosiding Seminar Nasional Pascasarjana IV-2004, institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.